

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2020.28.2.047>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 공항 수용량의 지연시간 산출방식 비교 연구

이효주\*, 김도현\*\*

## A Comparative Study on Delay Calculation Method of Airport Capacity

HyoJu Lee\*, DoHyun Kim\*\*

## ABSTRACT

Air transport demand is on a sharp rise due to growth in the aviation market. To prepare for this rapidly growing demand for aviation, airport operators are interested in the processing airport capacity. Airport throughput is determined to be the smallest of the facility capacities that make up the airport, but it is customary to determine the cost and time consuming runway capacity as airport capacity. Previous studies have shown that while recent studies have been conducted on airport capacity, there is little research on the criteria for determining capacity. In this study, we would like to determine the extent to which airport capacity is affected by the airport's operating hours and the resulting delays.

**Key Words** : Airport Capacity(공항수용량), Fast-time Simulation(배속시뮬레이션), SIMMOD(시모드), Delay(지연), Runway Capacity(활주로수용량)

## 1. 서 론

경제 규모의 성장으로 인한 항공 교통량의 증가는 빈번한 공항의 지연 및 혼잡으로 나타나고 있다. 이에 대비하기 위해 특히 공항운영자는 공항시설(활주로, 유도로, 주기장, gate 등)의 포화시점을 정확히 파악하여 이에 대비하는 것이 중요하다.

공항시설의 포화시점이란 각 시설의 예측수요가 처리용량을 초과하는 시점을 의미하며, 공항운영자는 예상 포화시점 이후 지속적인 운영이 가능하도록 공항의 수용량을 증대시키거나 혼잡함을 대비해야 한다. 공항은 다양한 시스템이 복잡적으로 연결된 네트워크 형태로 구성되기 때문에 특정 시설 처리용량이 증가하더라

도 다른 시설의 병목현상 발생으로 인한 공항 수용량 부족이 발생할 수 있다. 따라서 공항운영자는 각 시설의 용량을 검토, 분석하여 적절한 공항 수용량을 산정해야 한다.

공항 수용량은 채택된 관점에 따라 다양한 정의가 있을 수 있다[1]. 선행연구에서는 공항의 수용량을 연간 수용량, 계절적 수용량 그리고 시간당 수용량 등으로 구분하고 있다[2]. 공항의 수용량 산정 시 고려 요인은 공항의 활주로 구성 개수, 지리적 특성 및 이·착륙 제한 등이 존재한다. 따라서 공항 수용량은 시설의 특성 및 이용시간 별 특정 분포를 가지고 있기 때문에 수치기법을 통한 지표 도출이 어려워 공항 수용량 도출을 위해서는 미시적 접근이 가능한 시뮬레이션 분석을 통해 객관적인 지표를 도출하는 방법을 활용하고 있다.

공항 수용량 확인을 위해 운영시간 내 지연시간을 분석하여 혼잡 시점의 지연시간 내 최대 처리 가능한 항공기 수를 공항의 수용량으로 산출한다.

본 연구는 공항의 Airside 구성요소 중 주요 시설인 활주로 수용량 산정을 위한 방법론에 관한 연구를 진

Received: 08. Jun. 2020, Revised: 21. Jun. 2020,

Accepted: 21. Jun. 2020

\* 한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 석사수료

\*\* 한서대학교 항공교통물류학과 교수

연락처 E-mail : dhkim@hanseo.ac.kr

연락처 주소 : 충남 태안군 남면 고평로

행하고자 한다. 연구의 목적은 구축 검증된 미시적 항공교통시뮬레이션 모델(Simmod)를 활용하여 항공기의 평균 지연시간을 측정하고, 이를 기준으로 사례 공항의 수용량을 산정하며, 특정 시간 구간의 평균 지연시간을 통해 산출된 수용량을 분석하여 다양한 지연시간 산정 방식을 비교하고자 한다.

## II. 문헌 고찰

### 2.1 공항 수용량 산정 기법

공항 수용량은 크게 활주로/유도로 처리용량, 계류장 처리용량, 여객 터미널 처리용량, 항공교통관제업무 처리용량 중 가장 작은 값으로 산정된다. 공항 수용량은 크게 절대용량(absolute capacity)과 실용용량(practical capacity)으로 구분하는데, 절대용량은 동시 최대 수용량을 의미하며, 공항 운영 환경에서 산술적으로 도출할 수 있는 최대 수용량을 의미한다. 실용용량은 서비스용량 혹은 시간당 최대 처리용량을 의미한다. 이는 특정 시간 중 수용할 수 있는 수준의 평균 지연에 해당하는 항공기 운항대수를 평가하는 것이다.

위의 두 가지 수용량 측정방법의 차이는 지연시간의 고려 유무이다. 두 가지 수용량을 모두 고려하는 이유는 다양한 공항 및 비행장에 적용되는 지연의 수용 수준에 대한 논의가 부족하며, 공항마다 운영 환경의 차이로 인한 적용 기준 산정이 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 국내 선행연구를 바탕으로 인천국제공항 등 국내 다수 공항에 선행적으로 적용된 평균 지연시간 5분을 적용하여 시간당 공항 수용량을 도출하고자 한다.

미국 TRB(Transportation Research Board)에서 발행한 ACRP Report 79에서는 항공기 지연시간과 공항 수용량 정의 및 측정방법을 활주로 용량산정 분석

Table 1. Proposed levels of modeling sophistication

Level	방법론	분석모형	활주로 용량 산정 내용
1	Table Lookup	FAA Lookup Table	활주로 구성 및 항공기 혼합지수에 따른 절대용량
2	Chart, Monographs, Spreadsheet	Spread-Sheet Model	탈출 유도로 배치에 따른 절대용량
3	Analytical Model	Airfield Capacity Model	분리기준 및 활주로 점유시간에 따른 절대용량
4	Airfield Simulation	FLAPS	활주로 기준 시뮬레이션 모형에 따른 절대용량
5	Aircraft Delay Simulation	TAAM, SIMMOD, ADSIM	공역, 비행절차, 항공기 운항성능 등 항공교통요소와 지연시간을 고려한 실용용량

의 정밀도에 따라 Table 1과 같이 구분하였다. Level 1~4의 경우는 수식기반 산정 방식으로 절대용량 산정 시 고려되고, Level 5는 시뮬레이션 모델을 활용하여 항공기 운항 특성, 공역 구축 등 다양한 항공교통요소를 반영한 정밀 수용량 분석이 가능하다[3].

이는 대기행렬시스템과 같이 출·도착 항공기의 활주로 점유시간은 서비스 시간으로, 활주로 시단에서의 시간 분리간격은 평균 도착간격으로 구성되며, 항공기 운항횟수가 증가할 경우 평균지연시간은 지수함수 형태로 증가한다.

FAA AC150-5060에서 정의한 지연시간은 제약된 운영시간과 제약되지 않은 운영시간 간의 차이를 의미하며[4], ACRP Report 104에서는 “일반적으로 사건의 계획, 예정보다 늦게 발생할 때 적용 용어로 고유용어는 아니나, 공항계획, 항공사 운영에 따라 다르게 사용한다.”라고 서술하고 있다[5].

Fig. 2는 베를린 공항의 지연시간 산정 그래프로 일

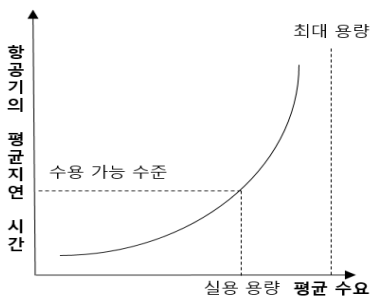


Fig. 1. Relationship between practical capacity and absolute capacity

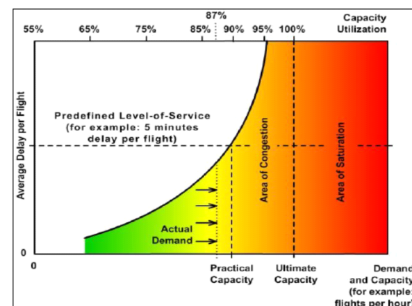


Fig. 2. Delay time calculation graph of Berlin airport[6]

정 구간 뒤 지연시간의 급격한 증가를 확인할 수 있다.

## 2.2 선행연구 고찰

선행연구에서는 활주로 용량을 분석의 정밀도에서 설명한 모형을 다양하게 활용하여 분석하였다. 일부 국내 활주로 용량 연구에서는 수용량 산정 시물레이션을 활용하여 연간 공항 수용량을 산출한 사례도 확인하였다.

윤석재(2014)는 인천국제공항을 사례로 항공교통시물레이션 모형 TAAM(Total Airspace and Airport Modeler)을 사용하여 활주로 용량을 산정하였고, 박지숙(2015)은 제주국제공항을 대상으로 연간 수용량을 산출하였으며, 이때 모형의 정확성을 검증하기 위해 시각적 검증 및 통계적 검증을 수행하였다. 방준(2019)은 인천국제공항을 대상으로 연간 공항 수용량 및 효율적인 고속탈출유도로 배치방안에 대한 시물레이션을 Simmod로 수행하였다. 본 연구는 이런 선행연구에서 공항 수용량을 산출하기 위해 사용한 평균지연시간 산정방식을 특정 공항을 대상으로 적용하고, 그 결과를 비교하고자 한다.

## III. 연구 내용

### 3.1 시물레이션 구축

본 연구의 시물레이션 모형 구축 및 검증에 관한 시간적 범위는 운항스케줄 자료 확보와 공항의 민·군 운항특성이 반영된 2018년 10월 13일 06시~23시까지로 설정하였다. 대상 공항에 대한 정보는 항공정보간행물(AIP) 및 관련 도면, 운항스케줄 자료(출처: UBIKAIS)를 기초하여 시물레이션 모형을 구축하였다(Fig. 3 참조).

레이다 유도방식을 주로 사용하는 대상 공항특성을 반영하여 활주로 수용량 산정을 위해 공항으로 진출입하는 항공기의 지연을 포함하고자 공간적 범위에 접근

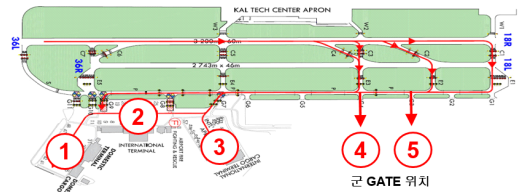


Fig. 4. Runway 36 taxiway layout and super-gate location

관제구역(terminal control area)을 포함하였고, 공항의 게이트는 주요 위치별로 통합하여 Super Gate를 지정하였다(Fig. 4 참조). 도착항공기의 경우 표준계기 도착절차의 첫접근지점(initial approach fix; IAF)부터 활주로에 착륙 후 Super Gate 진입까지의 구간을 범위로 설정하였다.

### 3.2 시물레이션 검증

시물레이션 모형과 실제 항적 간에는 오차가 발생할 수 있으므로 반드시 구축된 시물레이션 모형은 검증(validation)과정을 진행해야 한다.

시물레이션 모형 검증이란 시물레이션 데이터와 실제 데이터의 오차를 보정하여 공항을 현실에 가깝게 모사하도록 시물레이션 모형을 수정하는 과정이며, 이 과정에는 주요 입력 변수 값을 실패데이터에 가깝도록 보정하게 된다.

검증 방법은 관련 자료 입력을 통해 구축된 기본 시물레이션 모형을 두 단계의 검증과정을 거쳐 수정 및 보완을 진행하였다. 1차 검증은 정상적으로 구동하는 모형을 구축하였는지 점검하는 과정으로, 기본 모형 수행에 있어 시물레이션의 오류 발생 여부, 기능적 연결 구현의 적절성 여부를 확인하였고, 레이더 항적자료와 비교, 보정하여 시물레이션을 실제 운항데이터에 가깝게 모사하도록 수정하였다. 2차 검증은 일반적으로 검증된 모형과 30회 반복(iteration) 수행한 시물레이션 모형 사이에 선정된 검증지표를 바탕으로 그 차이를 비교하였다. 1차 검증 시 사용된 검증지표는 항공기 유도로 분포 및 시간당 항공기 출·도착 분포이다(Table 2 및 Fig. 5 참조).

2차 검증은 통계적 분석으로 출·도착 항공기의 운항시간(travel time)의 산포도를 사용하였다. 이때 산포도의 한 점은 항공기 1대의 1회 시물레이션 값을 의미하며, X축은 시물레이션 값, Y축은 항공기 항적 값을 의미한다.

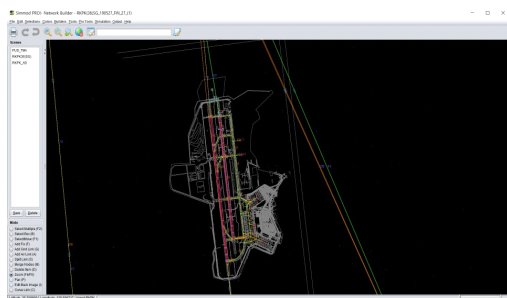


Fig. 3. Simmod air-link and ground-link

Table 2. Comparison of taxiway selection ratios

RWY	Exit taxiway	Observed data	Simulation data
36	C2	4%	5%
	C4	96%	95%

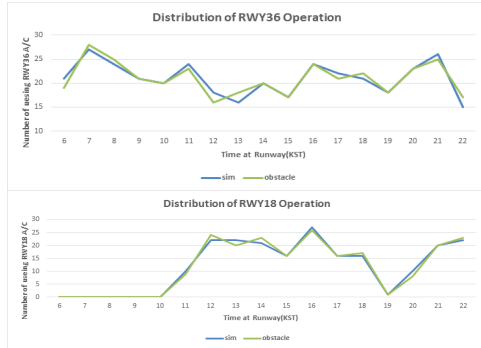


Fig. 5. Result of flight distribution verification by time period

시뮬레이션 결과의 편향정도는 다음 3가지 방법으로 분석하였다. 첫 번째 Bias는 시뮬레이션이 실제 관측 값을 과대/과소 추정하는지 구별하는 척도로 오차의 평균을 의미한다. 두 번째 RMSE는 시뮬레이션의 신뢰도를 판단할 수 있는 척도로 오차의 표준편차를 의미한다. 세 번째 피어슨상관계수(r)는 시뮬레이션 결과 값과 관측 값의 상관성(선형성)을 판단할 수 있는 척도를 의미한다.

Fig. 6의 결과를 보면 산포점이 45도 각도의 파란색 실선 외곽에 분포하며, Bias는 -1.32, RMSE는 6.98, 피어슨상관계수(r)은 0.46으로, 시뮬레이션 모형이 현실을 적절히 반영하지 못하고 있다고 판단하였다. 본 논문의 결과 값을 바탕으로 항공기 이동속도를 보정하여 보정된 모형을 구축하였다. Fig. 7은 보정모형의 검

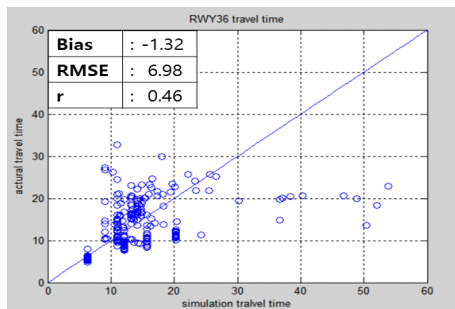
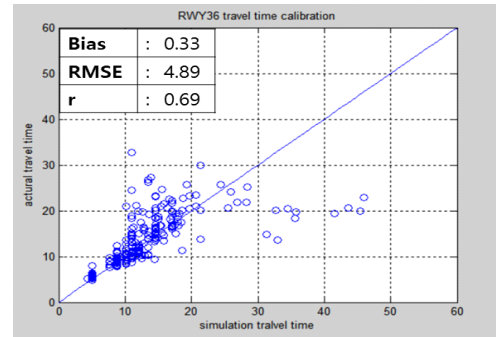
Fig. 6. 2<sup>nd</sup> verification for the basic modelFig. 7. 2<sup>nd</sup> verification for the calibrated model

Table 3. Result of travel time variability

구분	기본모형	보정모형
Bias	-1.32733	0.331994
RMSE	6.987601	4.897406
r	0.461463	0.69826

증결과로 산포점이 45도 각도의 실선 주변에 위치하며, Bias는 0.33, RMSE는 4.89, 피어슨상관계수(r)은 0.69로 결과적으로 정산 모형2가 과소/과대 추정정도 및 오차의 분산이 감소하였으며, 결과의 상관성이 증가하였다.

Table 3은 보정모형의 그래프에서 분산된 항공기를 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션 상의 운항시간이 레이다 항적보다 긴 운항시간을 가진 항공기를 의미한다. 수집된 항공기 항적을 확인한 결과, 대상 공항이 민·군이 공동으로 운영하는 공항으로, 교통장주 항공기의 영향, 관제사의 레이다 벡터 영향 등 공항 운영 요소로 인하여 추가 보정은 어렵다고 판단하였다.

## IV. 연구 결과

### 4.1 활주로 용량 산정

대상 공항의 수용량 산정을 위해 선정된 일자의 기본 운항 스케줄을 기본수요(0%)로 설정하였다. 기본 수요에 시간당 항공기 1대씩 증가(5%)시켜 총 8대(40%)까지 증가하는 시나리오를 설정하여 수용량을 산정하였다. 이때 시간당 1대씩 증가시킨 항공기는 실제 항공기 운항자료인 출·도착 항공기 비율, IAF, 항공기 운항 특성 비율 등의 자료를 분석, 반영하여 Excel 난수를 토대로 항공기 증가 시에 반영하였다.

Table 4. List of applied random numbers

난수 적용 요소	적용 방법
항공기 비율	항공기 운항 특성 반영
출·도착 비율	입출항 항공기 비율 적용
비행절차(IAF)	항공기 비행절차 (TMA 내 Waypoint 적용)
항공기 생성시간	항공기 생성 시간 적용

## 4.2 시간별 지연시간 분석 결과

본 연구의 평균지연시간 산정 기준은 수식 (1)과 같으며, 이때 분석 시간을 각 세분화하여 수용량을 산출하고자 한다.

$$\text{평균지연시간} = \frac{(\text{평균출발지연} \times \text{출발항공기수})}{\text{전체 항공기수}} + \frac{(\text{평균도착지연} \times \text{도착항공기수})}{\text{전체 항공기수}} \quad (1)$$

분석되는 시간기준에 따라 평균지연시간은 다르게 산출될 수 있다. 공항의 1일 운영시간 기준 모든 항공기의 지연시간을 평균화하는 방식, 피크 1시간의 항공기 지연시간을 산출하는 방안, 피크영향시간(피크시간 전 1시간, 이후 2시간, 총 4시간) 평균지연시간 산출 방안이다. 본 연구에서는 세 가지 방법으로 평균지연을 산출하여 수용량을 확인하고 비교하였다.

1일 기준 평균지연시간으로 산출한 수용량은 Table 5와 같다. 공항 운영시간 당 지연시간은 공항 운영시간 동안 출·도착 항공기의 모든 지연시간의 합을 항공기 수로 나눈 평균지연시간을 의미한다. 대상 공항의 운영시간은 하루 17시간으로 대상일 총 항공기 운항대수는 357대였으며, 지연시간은 평균 2분 6초로 분석되었다.

공항의 슬롯 조정을 위해 대형 공항의 경우는 수용량 산정 시 피크시간대의 수용량을 기준으로 운영되고 있다. 이는 공항운영 중 시간당 항공기 대수를 확인하

Table 5. Average delay time for airport operation hours

증가 비율	평균지연시간 (총 대수 - 시간)
0 %	357대 - 2분 6초
20 %	426대 - 3분 36초
30 %	443대 - 4분 18초
35 %	461대 - 4분 54초
40 %	478대 - 6분 35초

Table 6. Average delay time for peak hour

증가 비율	활주로 수용량 (피크시간 대수 - 시간)
0 %	27대 - 1분 7초
20 %	33대 - 2분 36초
30 %	34대 - 2분 45초
35 %	35대 - 4분 57초
40 %	38대 - 7분 56초

Table 7. Average delay time for peak hour(total 4 hours)

증가 비율	활주로 수용량 (피크시간 대수 - 분, 초)
0 %	27대 - 55초
20 %	33대 - 1분 45초
30 %	34대 - 1분 56초
35 %	35대 - 2분 49초
40 %	38대 - 7분 38초

여 피크시간을 판별한 후 피크시간 지연시간을 확인하여 평균지연시간을 산출한다. Table 6은 피크시간 1시간 평균지연시간을 나타내고 있다.

국내 수용량 산출 시, 피크시간에 발생하는 지연시간이 피크시간 전·후에 주는 혼잡해소 및 지연시간 영향 때문에 국내 국제공항의 경우는 피크시간 전 1시간, 이후 2시간(총 4시간)을 기준으로 하여 수용량은 산정하였다.

Fig. 8은 대상 공항의 피크시간 기준으로 한 4시간 평균지연시간을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과값을 가지고 수치해석프로그램(Matlab)을 통하여 평균지연시간을 산출하여 시간당 수용량을 산정하였다.

분석 결과, 대상 공항의 경우, 운영시간 내 평균지연시간 기준으로 수용량 산출 시, 시간당 27대, 피크시간(1시간) 평균지연시간으로 산출한 수용량은 35대, 피크시간(4시간) 평균지연시간 수용량은 37대로 분석되었다(Table 8 참조).

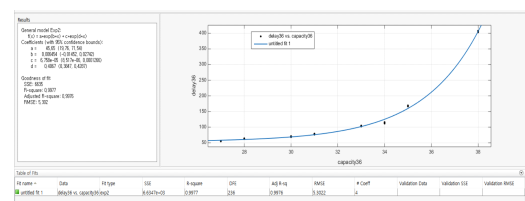


Fig. 8. Formula calculation using matlab

Table 8. Result of runway capacity by analysis criteria

구분	시간당 활주로 수용량 (대수 - 시간)
운영시간 내 평균지연시간	27대 - 4분 54초
피크시간 평균지연시간	35대 - 4분 57초
피크(4시간) 평균지연시간	37대 - 4분 50초

## V. 결 론

본 연구는 항공교통량의 지속적인 증가로 인한 공항 처리용량 분석을 위한 수용량 산정방법의 필요성이 대두되면서, 기존 문헌을 고찰하여 현실적인 공항 수용량 산정 방법을 연구하기 위하여 시작하였다.

공항 수용량은 채택된 관점에 따라 다양한 정의가 있을 수 있고, 이는 지연을 정의하면서, 설정된 분석시간 기준에 따라 결과적으로 상이한 수용량으로 나타날 수 있음을 확인하였다.

대상 공항의 경우, 시간당 항공기 운항 횟수에 큰 차이가 없음에도 시간의 기준에 따라 수용량이 다르게 산출된 것은 항공기 운항 특성으로 인하여 특정 시간에 지연이 집중됨에 따라 발생하는 특징이 반영된 것으로 판단된다. 따라서 수용량을 분석할 때는 공항의 운영 특징을 면밀히 파악하고, 기준되는 분석시간을 충

분히 검토하여 선정한 후 수용량을 산출하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## References

1. Gelhausen, M. C., Berster, P., and Wilken, D., "Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic?", *Journal of Air Transport Management*, 28, 2013, pp. 3-13.
2. Boonstra, J., Turkenburg, J., and De Wit, J. C., "Airport Capacity Looking Beyond the Runway", *Luchtvaartfeiten.nl*, 2016.
3. Transportation Research Board, "ACRP Report 79. Evaluating Airfield Capacity", 2012.
4. FAA AC150/5060-5, "Airport Capacity and Delay", 1983.
5. Transportation Research Board, "ACRP Report 104. Defining and Measuring Aircraft Delay and Airport Capacity Thresholds", 2012.
6. Bubalo, B., and Daduna, J. R., "Airport capacity & demand calculations by simulation the case of Berlin Brandenburg International Airport", *Berlin Airport*, 2011.